



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KRISTO LAMMI
SUORAMALLINNUS CAD-JÄRJESTELMISSÄ

Kandidaatintyö

Tarkastaja:
professori Antti Pulkkinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
22. helmikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

KRISTO LAMMI: Suoramallinnus CAD-järjestelmissä

Kandidaatintyö, 18 sivua

Lokakuu 2017

Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma

Pääaine: Konetekniikka

Tarkastaja: professori Antti Pulkkinen

Avainsanat: Suoramallinnus, CAD, suunnittelu, 3D-mallinnus

Työssä perehdytään CAD-järjestelmien kehittymiseen 2D suunnittelusta nykypäivän erilaisiin 3D suunnittelutekniikoihin. CAD-järjestelmien yleisimmin käytetty tekniikka, parametrinen mallintaminen, esitellään toiminnaltaan ja periaatteeltaan, jotta sitä voidaan vertailla suoramallintamiseen. Työssä esitellään suoramallinnuksen toimintaperiaatteet ja erilaiset tavat suoramallintaa. Molempien mallinnustekniikoiden eroja tarkastellaan mallin luomisen eri vaiheissa.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Työn tarkoitus	2
1.2	Rakenne	2
2.	TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU	3
2.1	Mallintamisen kehittyminen	3
2.2	Parametrinen mallintaminen	5
3.	SUORAMALLINNUS	6
3.1	Yleisimmät suoramallinnusteknologiat	7
3.2	Työkalut ja ominaisuudet	8
3.2.1	Piirteiden tunnistus	8
3.2.2	Pintamallintaminen	9
3.2.3	Historiaton parametrinen mallintaminen	10
3.2.4	Suora- ja dynaaminen muokkaus	12
4.	MALLINNUSTEKNIKKOIDEN VERTAILU	14
4.1	Mallin luominen	14
4.2	Mallin muokkaaminen	14
4.2.1	Mallin epäsuora muokkaaminen	15
4.2.2	Mallin suora muokkaaminen	15
4.3	Suoramallintamisen edut	16
5.	YHTEENVETO	17
	LÄHTEET	18

LYHENTEET JA MERKINNÄT

B-Rep	Boundary representation models
CAD	Computer Aided Design
2D	Kaksiulotteinen
3D	Kolmiulotteinen
PLM	Product Lifecycle Management

1. JOHDANTO

Kaikenlainen tekeminen vaatii aina suunnitelman, jotta se voidaan tehdä kunnolla. Suunnittelemisen auttaa vaikeidenkin töiden toteuttamisessa, sillä sen avulla voidaan työ jakaa ja pilkkoa pienempiin osiin. Suunnitelma auttaa hahmottamaan tulevaa tuotosta ja antaa mahdollisuuden vaikuttaa siihen jo ennen varsinaisten työvaiheiden aloittamista.

Nykymaailman työprojektit ovat niin laajoja, että työn suunnitteluun on erikseen suunnittelijoita. Mekaniikkasuunnittelussa suunnittelijat käyttävät työvälineenään erilaisia tietokoneavusteisia suunnitteluohjelmistoja eli CAD-ohjelmistoja. Niistä on tullut välttämättömiä kaikissa teollisuuden osa-alueissa, koska niiden avulla lopputuote kyetään hahmottamaan ja testaamaan ennen itse tuotteen valmistusta. Yleensä tuotteet myös valmistetaan CAD-malleista tehtyjen piirustusten avulla.

CAD-järjestelmiä on useita ja niillä kaikilla pystytään tekemään erilaisia suunnittelutoimenpiteitä. Vaikka monilla CAD-järjestelmillä suunnitellaan hyvin samanlaisia tuotteita, järjestelmät eivät usein osaa tulkita toisten järjestelmien tuotoksia. Järjestelmien eri tiedostomuodot ovatkin usein esteenä CAD-mallin siirtämisessä suoraan CAD-järjestelmästä toiseen. Nykyisin mallin geometrian siirtäminen järjestelmästä toiseen on yksinkertaista, mutta itse mallinnushistorian eli historiapuun siirtäminen mallin mukana toiseen järjestelmään on vielä hankalaa. Historiapuu on parametrinen mallintamisen osa, joka muodostuu mallia luodessa ja ilman sitä mallia ei voida perinteisin parametrinen mallintamisen keinoin muokata. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on erilainen mallinnustekniikka, suoramallinnus.

Suoramallinnus toi mallinnustekniikkana mukanaan mahdollisuuden mallin historiattomaan muokkaukseen. Sen avulla voidaan mallin erilaiset piirteet tunnistaa ja mallia voidaan muokata usein erilaisin toimenpitein. Suoramallinnustekniikalla mallintaminen on myös paljon luovempaa, kuin parametrisella mallinnustekniikalla mallintaminen, koska suunnittelija on vapaa parametreista ja voi käsitellä mallia halutessaan muovailuvahan tavoin. Suoramallinnusta voidaan myös käyttää perinteisen parametrinen mallintamisen kanssa yhdessä ja mallinnushistoria voidaan kirjata historiapuuhun tai toimia täysin ilman sitä.

CAD-järjestelmien kehittäminen on tärkeää suunnittelun tehokkuuden kannalta. Suoramallinnustekniikan yhdistäminen perinteiseen parametriseen mallintamiseen antaa suunnittelijoille mahdollisuuden uudenlaiseen työskentelyyn, sekä poistaa paljon perinteisen parametrinen mallintamisen haittoja. Suoramallinnus tuo myös CAD-

järjestelmien välisen yhteyden lähemmäs toisiaan, koska suoramallinnuksella voidaan muokata muiden CAD-järjestelmien tuotoksia.

1.1 Työn tarkoitus

Työssä perehdytään CAD-mallintamisen kehitysvaiheisiin sekä perinteisen parametrisen mallintamisen ja suoramallinnuksen tekniikoihin, etuihin ja vahvuuksiin. CAD-järjestelmissä parametrinen mallintaminen on mekaniikkasuunnittelussa käytetyin suunnittelutekniikka. Tämän vuoksi työssä kerrotaan myös parametrisen suunnittelun periaatteista ja tekniikoista, jotta sitä voidaan verrata suoramallinnukseen.

Suoramallintaminen on lisääntynyt jatkuvasti viime vuosina ja yhdistettynä parametriseen mallintamiseen suunnittelutyössä, se on todella tehokasta. Suoramallinnuksen tuomista eduista ja mahdollisuuksista kerrotaan työssä laajasti. Työn keskeinen tarkoitus on kertoa suoramallintamisen ja parametrisen mallintamisen eroista, ja miten ne tulevat jatkossa muokkaamaan tapaamme suunnitella, kun niitä käytetään tehokkaasti yhdessä.

1.2 Rakenne

Työ on jaettu kolmeen osioon siten, että ensimmäiseksi aloitetaan CADin historiasta ja sen kehittymisestä kohti nykypäivän CAD-suunnittelua. Seuraavaksi käsitellään perinteisen parametrisen mallintamisen tekniikoita ja niiden tapaan luoda 3D-malleja.

Tämän jälkeen perehdytään suoramallintamiseen ja sen tapoihin luoda ja muokata 3D-malleja. Suoramallintamisen erilaisista sovelluksista ja työkaluista kerrotaan ja mitä uutta niillä voidaan tehdä parametriseen mallintamiseen verrattuna. Erilaisia suoramallinnuksen käyttökohteita ja sovellusmahdollisuuksia käsitellään osion lopussa.

Lopuksi kerrotaan mallinnustekniikoiden eroista mallintamisen eri vaiheissa sekä mallin suorasta- ja epäsuorasta muokkaamisesta. Lisäksi perehdytään suoramallintamisen etuihin parametriseen mallintamiseen nähden.

2. TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Tietokoneavusteinen suunnittelu (*Computer-Aided Design tai CAD*) mekaanisessa suunnittelussa tarkoittaa tietotekniikan mahdollistamaa tapaa luoda tuotteen geometria ja tuotteen rakenne virtuaalisessa ympäristössä. CAD-prosessien tarkoitus on luoda näkymä tuotteen geometriasta ja rakenteesta sekä sisällyttää kaikki tarvittavat geometrian muutosoperaatiot ja rakenteeseen liittyvät toimenpiteet mallissa. Tuotteiden geometrinen esitys voi vaatia monimutkaisten luonnosten, pintojen ja kiinteiden mallien luontia mallinnusavaruudessa, joten erilaiset tekniikat, kuten geometrian määrittäminen, yksinkertaistus ja interpolointi, ovat tärkeitä. Sen lisäksi, että CAD-ohjelmistolla luodaan geometriamalleja, se luo myös pohjan muille insinöörien työtehtäville ja mallin valmistelulle. (Hirz et al. 2013, s. 241)

Ilman CAD:ää monet nykymaailman tuotteet, kuten autot, lentokoneet ja laivat, eivät olisi lainkaan niin edistyneitä kuin ne nykyisin tunnetaan. Se on mahdollistanut tarkan ja selkeän suunnittelutavan, jonka kautta yritykset voivat yksiselitteisesti kommunikoida keskenään tuotteidensa välityksellä. CAD on siis tavallaan suunnittelijoiden yhteinen kieli, jota ymmärretään kaikkialla.

2.1 Mallintamisen kehittyminen

Tietokoneavusteinen suunnittelu on jatkuvasti kehittynyt 1960-luvun alusta lähtien (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 1). CAD-ohjelmia kehitellään eteenpäin jatkuvasti ja eri yhtiöiden CAD-ohjelmia on monia. Mikään CAD-ohjelma ei ole koskaan valmis vaan uusia työkaluja ja mallintamistekniikoita luodaan lisää sekä olemassa olevia työkaluja parannellaan.

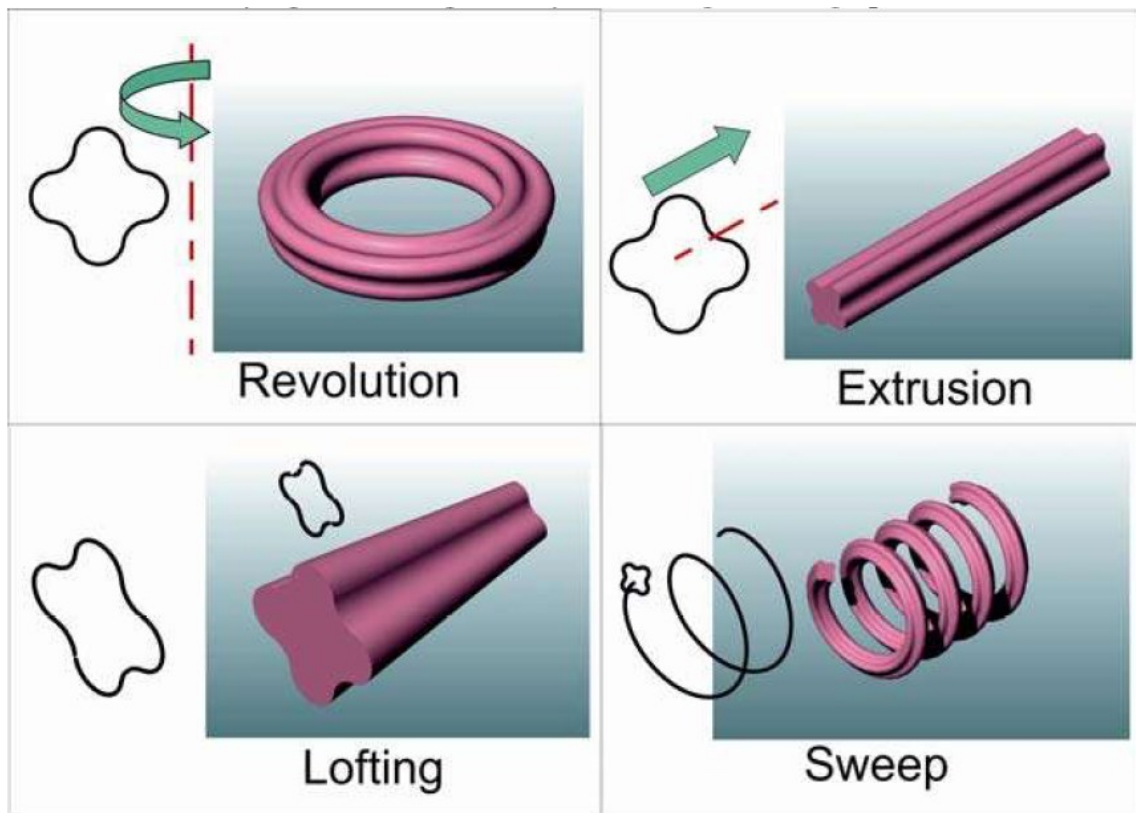
Tietokoneavusteinen mallintaminen oli aluksi vain kaksiulotteista (2D), ja malli esiteltiin eri projektioissa siten, että vain ääriviivat ja reunat näkyivät. Seuraava vaihe oli tuoda malli kolmiulotteiseen (3D) avaruuteen, jossa edelleen näkyvillä olivat vain mallin ääriviivat. Tätä mallia kutsutaan rautalankamalliksi (*wireframe representation*), ja se mahdollisti 2D-kuvien luonnin mistä tahansa mallin suunnasta. Rautalankamallien suurin ongelma oli niiden epäselkeys, sillä mallin kaikki reunat näkyivät kuvassa samanaikaisesti. Tämän vuoksi suunnittelijan oli vaikeaa erottaa, mikä mallin piirteistä oli edessä sekoittamatta sitä mallin takana oleviin muihin piirteisiin. (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 4)

Seuraavaksi rautalankamallit kehittyivät siten, että reunojen väliin luotiin pinta. Tämän esitystavan englanninkielinen nimitys on *Boundary Representation* tai *B-Rep*. Mallit luotiin niin, että mallien geometria muodosti ”ilmatiiviin” kokonaisuuden 3D-avaruudessa. B-Rep-malli kuitenkin eroaa pintamallista, koska sillä on aina suljettu

tilavuus, joka säilyy rikkoutumatta muokkauksista huolimatta. (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 4)

Tämän jälkeen mallit määriteltiin 3D-avaruuteen niiden vievän tilavuuden mukaan, mikä mahdollisti mallien yksiselitteisen matemaattisen esityksen. Tämän avulla pystyttiin tunnistamaan, oliko jokin mallinnusavaruuden piste kiinteän mallin sisällä, reunalla vai ulkopuolella. Mallinnus kehittyikin uudelle tasolle, kun malleja luotiin nyt erilaisilla loogisilla operaatioilla (*Boolean operations*). Tämä tarkoitti eri mallien yhdistämistä (*union*), yhteisten rajapintojen leikkausta (*intersection*) ja tilavuuden poisto-operaatiota (*subtraction*). (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 5)

Seuraava todellinen innovaatio tapahtui 1990-luvulla, kun Parametric Technology -yhtiön CAD-ohjelma Pro/Engineering (*ProE*) julkaistiin. ProE:n ero aikaisempiin CAD-ohjelmiin oli luonnoksiin perustuva käyttöympäristö, joka mahdollisti luonnosten tarkan määrittämisen pituuksien ja rajoitusten avulla. Aikaisemmat loogiset operaatiot korvattiin erilaisilla operaatioilla, kuten pursotus (*extrude*), pyöräytys (*revolve*), lisäys (*protrude*) ja leikkaus (*cut*) (kuva 1). Nämä toiminnot toteutettiin luonnosten profiileilla, jotka operaation jälkeen muodostivat 3D-mallin. (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 5–6)



Kuva 1. Esimerkkejä luonnosprofiilin käytöstä 3D-mallin luomisessa (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 6).

Nykyisissä CAD-ohjelmissa on edelleen mahdollista luoda kaikilla edellä mainituilla tavoilla malleja. Kuitenkin parametrinen mallintaminen, jonka Parametric Technology 1990-luvulla esitteli ProE-ohjelmassaan, on eniten käytetty tapa mallintaa edelleen. Parametrinen mallintaminen ei kuitenkaan ole ongelmaton, ja näitä ongelmia uudenlainen mallinnustekniikka, suoramallinnus, pyrkii eliminomaan. Näiden mallinnustekniikoiden eroihin ja mahdollisuuksiin palataan tämän kandidaatintyön myöhemmissä luvuissa.

2.2 Parametrinen mallintaminen

Parametrisen mallintamisen idea on linkittää geometriakohteita toisiinsa erilaisin geometrisin rajoittein sekä pituusmääritelmien avulla. Mallin geometriset elementit ja niiden muodostamiseen käytetyt parametrit erotetaan myös selkeästi toisistaan. Asetetut parametrit vaikuttavat malliin joko suoraan tai yhtälöiden kautta. Muutoksen tapahtuessa mallin on pysyttävä johdonmukaisena, jonka jälkeen halutut muutokset luodaan. (Hirz et al. 2013, s. 246–247)

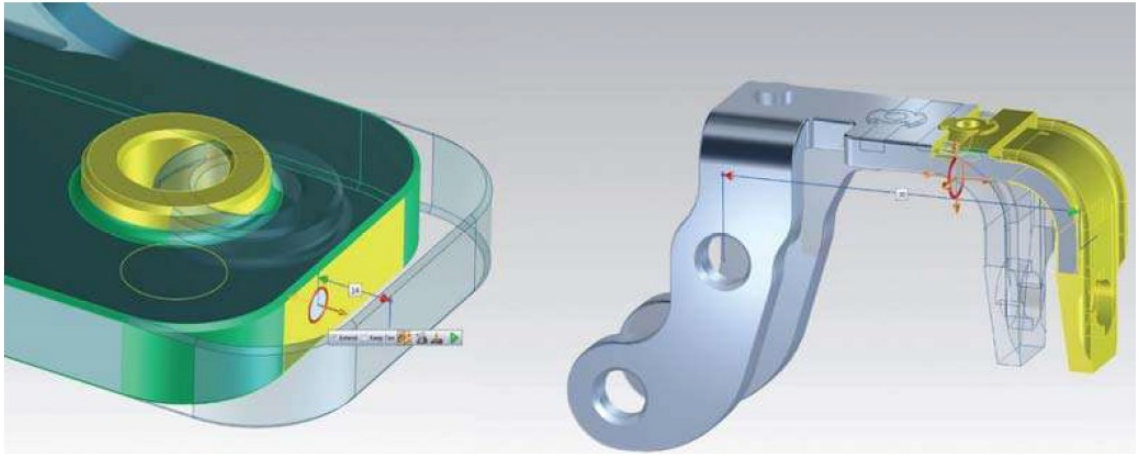
Kun mallia tehdään, CAD-ohjelma muistaa jokaisen tehdyn toiminnon ja järjestyksen eli luo historiapuuta mallin piirteistä. Uudet piirteet luodaan vanhojen piirteiden päälle ja historiapuu linkittää uusien piirteiden yhteydet ja parametrit edeltäviin piirteisiin. Tämä historiaseuranta tavallaan luo yksityiskohtaiset ohjeet mallin valmistamiseen. Jos suunnittelija tekee muutoksen johonkin mallin vanhaan piirteeseen, on ohjelman rakennettava kaikki sen jälkeen luodut piirteet uudestaan noudattaen kaikkia määriteltyjä parametreja ja rajoitteita. (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 6–7)

3. SUORAMALLINNUS

Suoramallinnuksella tarkoitetaan CAD-järjestelmissä ohjelman kykyä tunnistaa ja muokata mallin pintoja, piirteitä ja reunoja. Suoramallintamisessa mallinnushistoria ei vaikuta muokkaustoimenpiteisiin mitenkään. Tällöin mallin geometrian ei tarvitse olla ”älykäs”, kun CAD-järjestelmä tunnistaa mallin piirteet. CAD-ohjelmalla voidaan muuttaa mallin geometriaa tuntematta, missä ja miten geometria on alun perin luotu. Suoramallinnustyökalut kykenevät tunnistamaan mallin piirteet ja käyttämään niitä oikein. Tämän vuoksi suoramallinnus yleensä sopii paremmin valmiin geometrian muokkaamiseen, kuin mallin luomiseen alusta alkaen. Suoramallinnuksen hyviä käyttökohteita ovat ei-alkuperäisen CAD-datan muokkaus, eli esimerkiksi toisesta CAD-sovelluksesta tuodun mallin muokkaus, ja todella monimutkaisen historiapuurakenteellisen mallin muokkaus. (Hakala 2015, s. 16)

Suunnittelijoille suoramallinnus on hyvin käyttäjäystävällinen tapa lähestyä 3D-mallintamista. Suunnittelija voivat tällä teknologialla muokata malleja nopeasti ilman, että he tietävät mitään mallin historiapuusta. Lisäksi suunnittelijat voivat helposti jatkaa mallin muokkausta eteenpäin toisen suunnittelijan jälkeen, mikä mahdollistaa todella toimivan CAD-mallin eteenpäin viemisen suunnittelutiimien välillä. (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 7)

Muutoksia 3D-mallien geometriaan voidaan tehdä nopeasti ja helposti suoralla vuorovaikutuksella mallin piirteisiin (kuva 2). Tällaista suoramallintamista kutsutaan myös historiattomaksi mallintamiseksi. Se voi olla tehokkainta mallintamisen aikaisemmissa vaiheissa, kun suunnittelija voi tehdä isoja muokkauksia tuotteeseen välittämättä mallinnusprosessista. Suoramallintaminen voidaan oppia hyvin lyhyessä ajassa, koska siinä tapa mallintaa on hyvin samankaltainen 2D mallintamisen kanssa, joten 2D suunnittelijat voivat suoraan tuoda taitonsa suoramallinnukseen. (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 7)



Kuva 2. Historiattoman suoramallintamisen tapa muokata mallin piirteitä, kuten kuvassa piirteen paikkaa (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 8).

3.1 Yleisimmät suoramallinnusteknologiat

Eri CAD-ohjelmistojen valmistajat ovat luoneet omia suoramallinnustyökaluja ja yhdistelleet mallinnusteknologioita omiin ohjelmiinsa. Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti muutaman yleisimmän CAD-ohjelman suoramallinnusteknologioita.

Siemens PLM Softwaren CAD-ohjelmat NX ja Solid Edge käyttävät suoramallinnusteknologiaa nimeltä *Synchronous Technology*. Se yhdistää historiarakenteisen mallintamisen ja suoramallinnuksen välttämällä mallinnus prosessin huonot puolet. Suunnittelija voi valita toimiiko hän historiattomassa vai historiarakenteisessa tilassa ja hyödyntää parametrisia- ja suoramallinnustyökaluja. Suoramallinnuksen tekemät muutokset voidaan siis kirjata mallinnushistoriarakenteeseen samaan tapaan, kuin parametriset mallinnusmuutokset (Siemens PLM Software 2008; Kirov 2011)

Autodeskin CAD-ohjelma Inventor käyttää teknologiaa *Inventor Fusion Technology*, joka on hyvin samankaltainen, kuin Synchronous Technology. Se myös yhdistää historiarakenteellisen mallintamisen edut historiavapaan suoramallinnuksen kanssa. (Autodesk, Inc. 2009)

Dassault Systemesin CAD-ohjelma SolidWorks käyttää teknologiaa nimeltä *SolidWorks Instant 3D*. Se hyödyntää suoramallinnusta historiarakenteessa säilyttäen rakenteen ja tekee muutoksista merkinnät rakenteeseen. SolidWorks Instant 3D:ssä ei siis ole historiattoman mallintamisen ominaisuutta ja sen avulla pääasiassa muutetaan vain geometrian parametreja kuvan 2 tapaan. Näin kuitenkin välttyään teknologioiden sekoittamisen haitta-alueilta mallinnusprosessissa. (Hakala 2015, s. 18)

PTC:n CAD-ohjelma Creon käyttämä teknologia *Creo Elements/Direct* hyödyntää historiatonta mallinnusta ja täyttää suoramallinnusta. Se on erityisesti tarkoitettu monen

CAD-ohjelman ympäristöön ja on tehty tukemaan kaikkia yleisiä CAD-formaatteja. (PTC verkkosivut)

Ansyksen 3D-mallinnusohjelma *SpaceClaim* on pelkästään suoramallinnusta varten tehty ohjelma, joka myös on tehty monen CAD-ohjelman ympäristöä varten, jotta malleja voidaan muokata kaikista tunnetuista CAD-ohjelmista. Parametrin mallintamisen puute *SpaceClaim*issa voi haitata mallinnustyötä. (Hakala 2015, s. 18)

3.2 Työkalut ja ominaisuudet

CAD-järjestelmien suoramallinnukseen käytettävät työkalut vaihtelevat ohjelmistojen välillä, mutta kaikista pystytään erottelamaan työkalut käyttötarkoitusten mukaan ryhmiin. Nämä ryhmät ovat piirteen tunnistaminen, pintamallintaminen, historiaton parametrinen mallintaminen, suora muokkaus (*direct editing*) ja dynaamisen muokkauksen työkalut (Hakala 2015, s. 21–27).

3.2.1 Piirteiden tunnistus

Piirteen tunnistuksen työkaluja on käytetty CAD-järjestelmissä jo pitkän aikaa. Sen alkuperäinen tarkoitus on ollut muokata ”tyhmistä” historiattomista malleista piirrepohjaisia parametrisia malleja. Vaikka teknologia on ollut käytössä jo kauan, niin sen avulla ei voida tunnistaa kaikkia monimutkaisia piirteitä mallista oikein. Se on kuitenkin käytännöllinen, kun mallit ovat kohtalaisen yksinkertaisia. (Hakala 2015, s. 21)

Piirteen tunnistuksen vaikeus perustuu siihen, että mallit voidaan luoda usealla eri tavalla vaikka lopputulos on geometrisesti identtinen. Kun piirteitä tunnistetaan, niin mallin alkuperäiset suunnitteluvaiheet muuttuvat erilaisiksi ja alkuperäisen suunnittelijan mallipiirteiden tarkoitus voidaan menettää. Monimutkaiset piirteet, kuten akselien ympäri pyyhkäisyt (*sweep*) ja luonnosten väliset pursotukset (*loft*), jäävätkin yleensä tunnistamatta (kuva 1). (Tornincasa & Di Monaco 2010, s. 13)

Työkalu toimii siten, että käyttäjä valitsee mallista pinnan, jolle ohjelma ajaa piirteentunnistuksen ja ehdottaa erilaisia vaihtoehtoja. Tunnistettavia piirteitä ovat muun muassa pursotus (*boss*), tasku (*pocket*), rako (*slot*) sekä piirteiden yhteydet, kuten samantasoisuus (*coplanar*), symmetrisyys ja tangentiaalisuus. Kokenut käyttäjä osaa valita järkevät piirteet mallille ja tällä tavoin edetään mallissa niin pitkälle, että saadaan mallin kaikki piirteet tunnistettua. Aina tulokset eivät ole toivottuja, mutta pitkälle kehitetty ohjelmisto toimii kuitenkin ennustettavalla tavalla. Kun malli ollaan saatu täydellisesti käytyä läpi, sitä voidaan käsitellä kuten mitä tahansa parametrisoitua mallia, mikä puolestaan avaa monelle muulle työkalulle mahdollisuudet tehdä muutoksia. (Hakala 2015, s. 21)

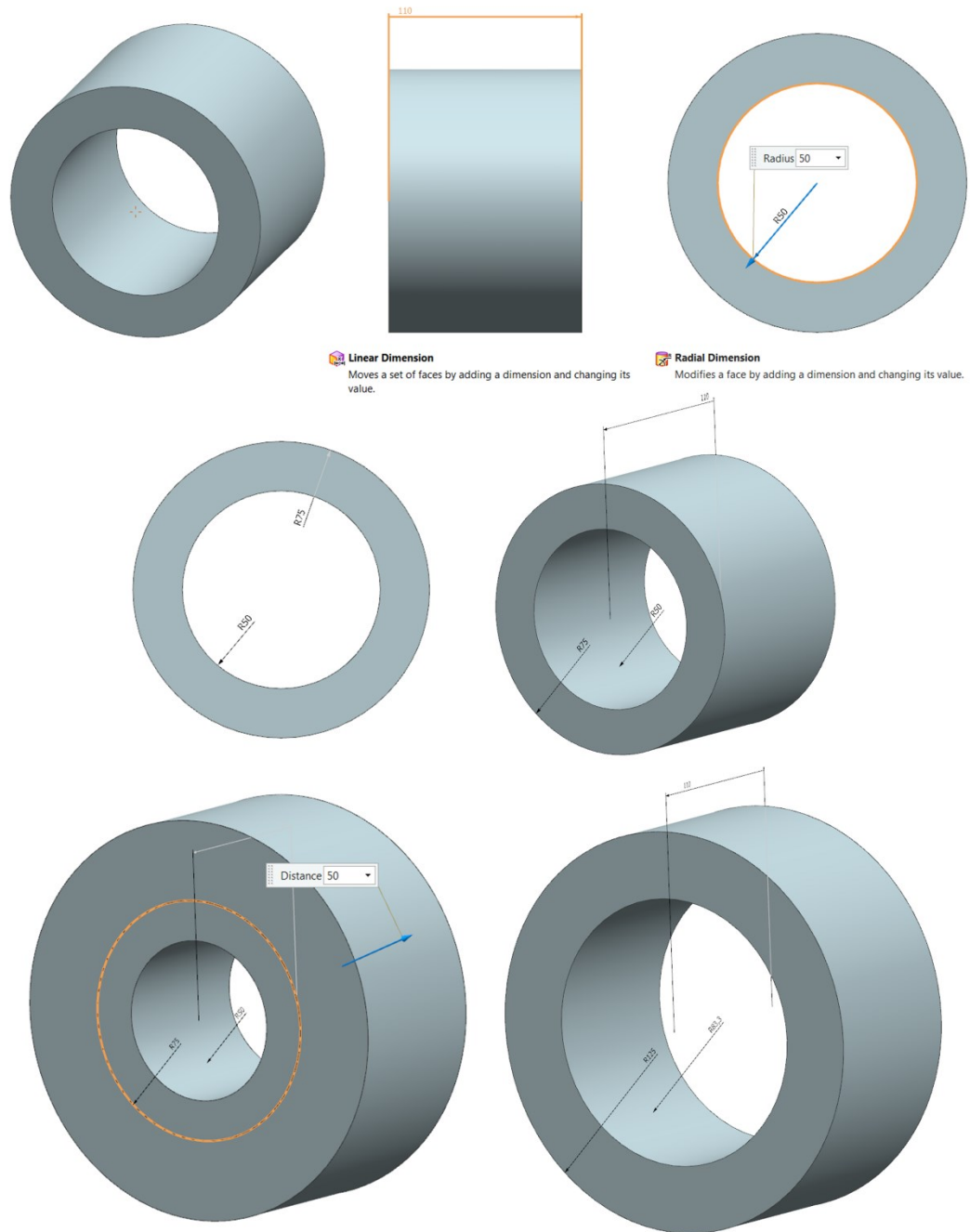
3.2.2 Pintamallintaminen

Jotkin mallinnusjärjestelmät työstävät vain pintamalleja (*surface models*), eivätkä umpinaisia malleja (*solid models*). Pintamallien työstämiseen tarvitaan erilaiset työkalut kuin umpinaisiin malleihin. Varsinkin jos pintamallin ja umpinaisen mallin historiarakenteessa on yhteyksiä toisiinsa, niiden muokkaaminen on huomattavasti haastavampaa, koska yhteydet pitää säilyttää rikkomatta mallia. (Hakala 2015, s. 22)

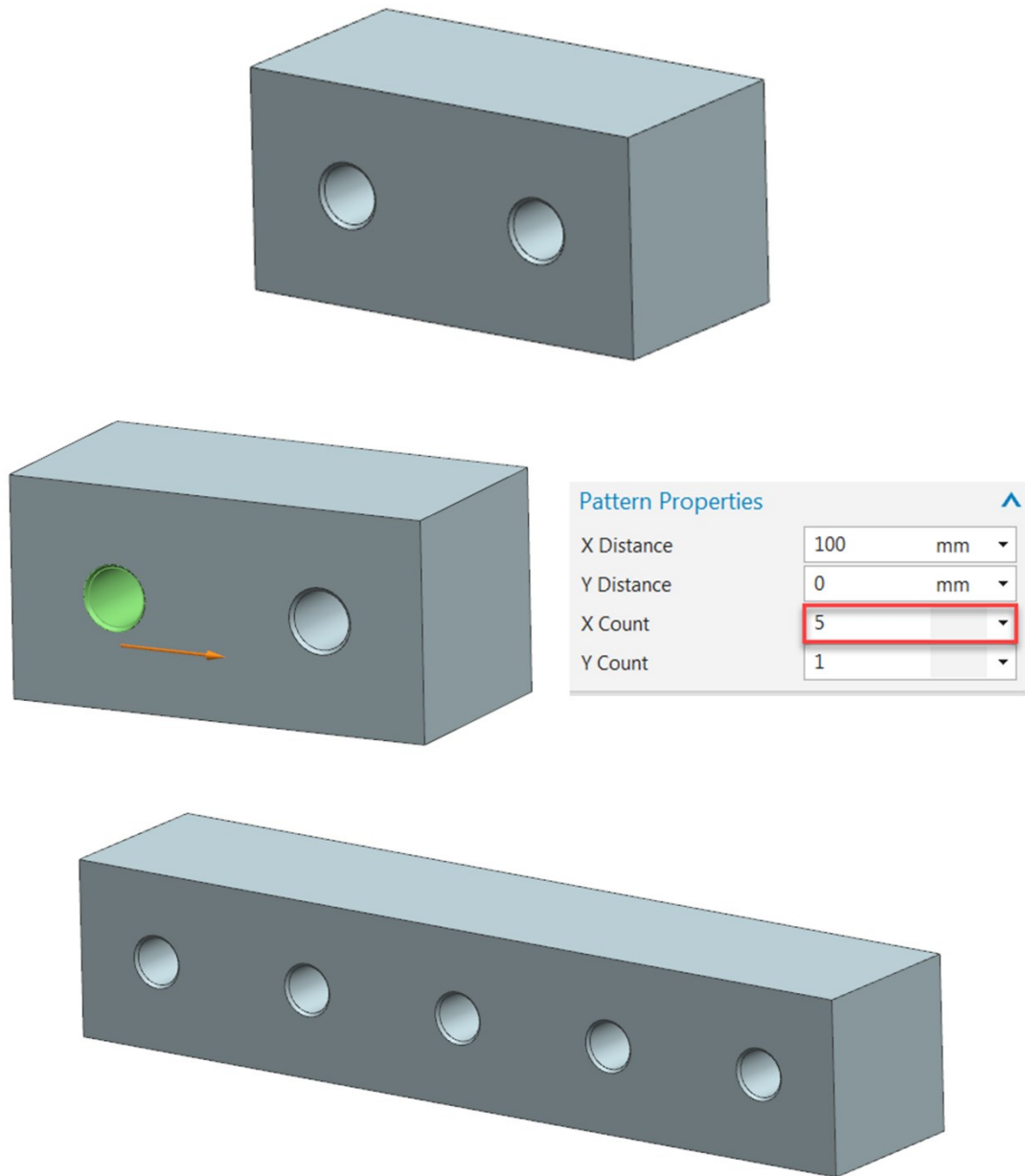
Historiaan perustuva mallintaminen on yksinkertaista pintamallien suhteen, sillä monimutkaiset pinnat luodaan ja muokataan käyttäen luonnospiirustuksia (*sketch*). Pintamalleilla on omat parametrinsa historiapuussa ja niitä voi muokata jälkikäteen kätevästi (Hakala 2015, s. 21). Historiaton mallintaminen työstää pintaa 3D tasossa, joka vaatii monimutkaisempia työkaluja. Kuitenkin sillä saadaan aikaiseksi samat pinnat, mutta tilannekohtaisesti haastavuus vaihtelee historiattoman ja historiaan perustuvan mallintamisen välillä.

3.2.3 Historiaton parametrinen mallintaminen

Historiattomassa ympäristössä parametrit voidaan määrittää milloin tahansa mallin luonnin aikana. Parametrit voidaan lisätä tai poistaa milloin tahansa mallin haluttujen piirteiden saavuttamiseksi. Myös muista CAD-järjestemistä tuodut mallit voidaan täysin rajoittaa (*constrain*) ja parametrisoida geometrisillä rajoituksilla ja yhteyksillä. (Hakala 2015, s. 24)



Kuva 3. Historiattoman mallintamisen parametrinen muokkaus Siemensin NX mallinnusohjelmalla.



Kuva 4. *Historiattoman mallintamisen parametrinen älykäs mallintaminen Siemensin NX mallinnusohjelmalla.*

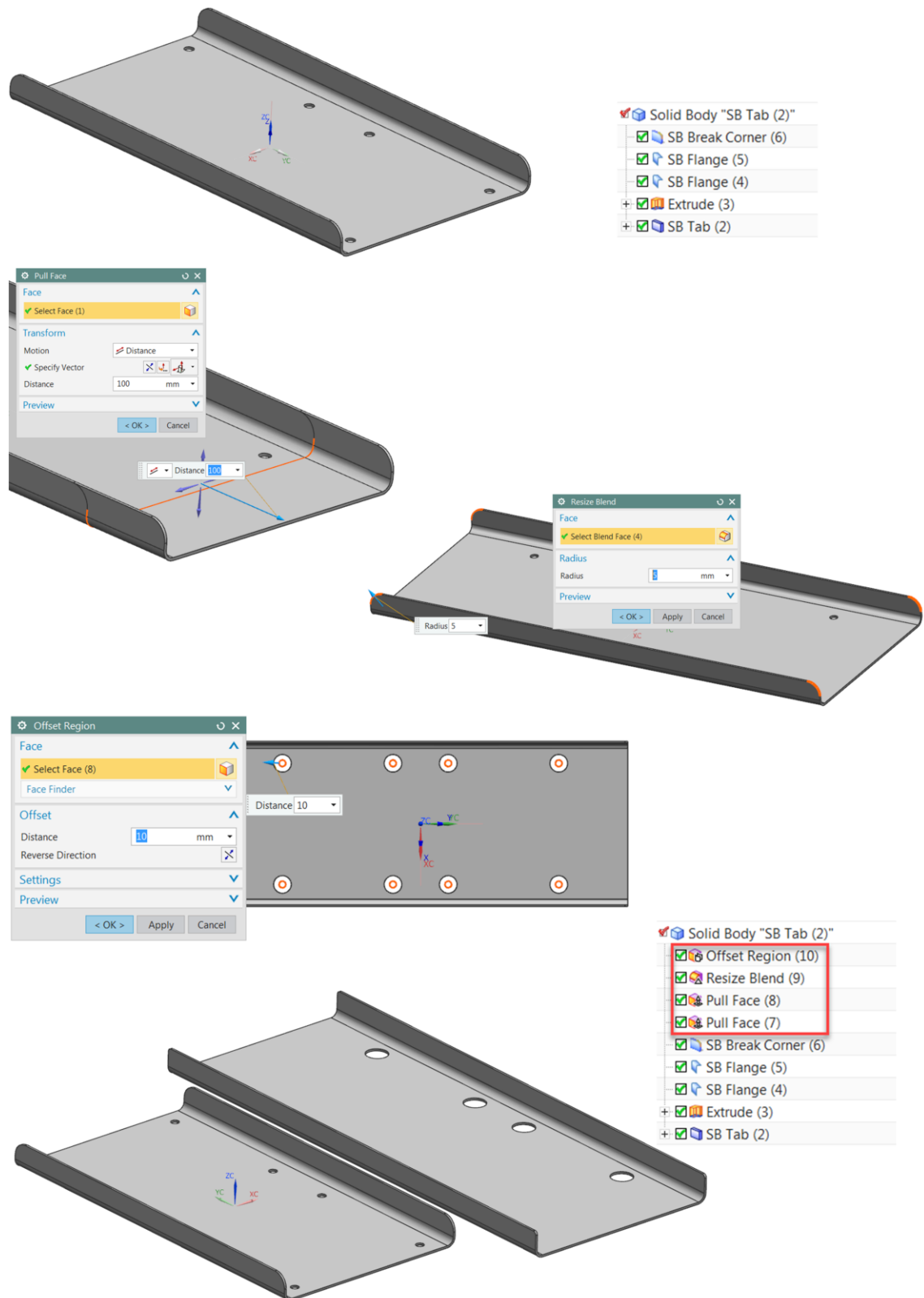
Kuvassa 3 sylinteri parametrisoidaan ja lopuksi sen mittoja muutetaan. Tässä sylinterin sisä- ja ulkosäde tunnistettiin ja ulkokehän säteelle annettiin ehdoksi, että sen on oltava 1,5 kertainen sylinterin sisämitta nähden. Kun ulkomittaa kasvatetaan suoramallinnustyökalulla, niin malli tottelee annettua ehtoa siten, että sisä- ja ulkosäteiden suhde säilyy. Kuvassa 4 mallista tunnistetaan reiän piirre ja sidotaan sen lukumäärä palkin pituuteen. Ehdon määrittämisen jälkeen reikien määrää kasvatetaan ja palkin pituuden muutos tapahtuu automaattisesti reikien määrän mukaan.

3.2.4 Suora- ja dynaaminen muokkaus

Suoramuokkaus (*direct edit*) malliin voidaan tallentaa tai olla tallentamatta historiapuuhun. Vaikka mallilla olisikin historiapuu, niin suoramuokkaus voidaan tehdä ilman historiapuumerkintää. Jos siitä ei tehdä historiapuumerkintää, on kyse dynaamisesta muokkauksesta. (Hakala 2015, s. 26)

Nykyisissä historiaan perustuvan mallintamisen CAD-järjestemissä on jonkinlaisia suoramuokkaustyökaluja. Näiden työkalujen avulla suunnittelija voi suoraan muuttaa monimutkaisenkin mallin piirteitä helposti ja muutokset tallentuvat historiapuuhun. Joskus näiden suoramuokkaustyökalujen avulla muokattu malli voi olla jopa selkeämpi historiarakenteeltaan, kuin perinteisillä mallinnustyökaluilla muokattu malli. (Hakala 2015, s. 26) Oikein käytettynä suoramuokkaus voi olla kaikkein tehokkain parametrinen mallinnustyökalu, joka CAD-ohjelmistossa on käytettävissä (Hamilton 2012).

Siemensin NX mallinnusohjelmalla on mahdollista tehdä malliin suoramuokkausta ja dynaamista muokkausta. Kuvan 5 malliin tehdään suoramuokkauksella kolme erilaista toimenpidettä: pinnan veto (*pull face*), pyöristyksen koon muutos (*resize blend*) ja alueen koon muutos (*offset region*). Malli on esiteltynä aluksi sellaisenaan, kuin se parametrisella mallinnuksella on toteutettu historiarakenteineen. Tämän jälkeen käytetään suoramuokkaustyökaluja. Lopuksi alkuperäinen ja muokattu malli esitellään rinnakkain ja muokatun mallin historiapuu on myös esillä. Muokkaukset olisi voitu tehdä myös dynaamisesti, jolloin ohjelma ei olisi tehnyt historiapuumerkintöjä suoramuokkaustyökaluista.



Kuva 5. Suoramuokkaustyökalujen käyttöesimerkki Siemensin NX mallinnusohjelmalla.

4. MALLINNUSTEKNIIKOIDEN VERTAILU

Historiaton mallintaminen ja suoramallinnus ovat keränneet paljon huomiota viime vuosina ja kaikissa yleisissä CAD-ohjelmistoissa on niihin työkaluja. Monet suunnittelijat jo hyödyntävätkin näitä uusia työkaluja arkipäiväisessä suunnittelutyössään. Historiaton suoramallintaminen on olennaisesti erilaista verrattuna historiapaiseen parametriseen mallintamiseen. Eroavaisuuksien vuoksi suunnittelijan on myös osattava ajatella mallinnusta eri tavalla käyttäessään näitä uusia työkaluja, sillä muuten uudet mallinnustavat voivat jopa vaikuttaa rajoittavilta, jos niitä ei käytetä niiden mahdollisuuksien mukaan. (Hakala 2015, s. 35)

Se, että historiaton mallintaminen ei luo rakenteeseen historiapuuta, voi olla ongelma jos tuotteen suunnitteluprosessi vaatiikin sitä. Historiarakenteen omaava malli voi olla samalla joustava tai rajoitteellinen riippuen siitä, mitä sille pitää tehdä myöhemmissä vaiheissa. Rakenteellisia malleja ei silti aina tarvita ja silloin ne voidaankin tehdä historiattomalla mallintamisella. On kuitenkin ymmärrettävä historiarakenteellisen suunnittelun tärkeys tuotteen kehitysprosessissa. Jos kuitenkin historiarakenne ei tuo mallille lisäarvoa, voi olla järkevää ottaa suoramallinnus ja historiaton mallintaminen mahdollisiksi vaihtoehdoiksi. (Hakala 2015, s. 35)

4.1 Mallin luominen

Kun 3D mallia lähdetään luomaan, niin mallinnustekniikoiden välillä ei ole suuriakaan eroavaisuuksia. Erot alkavat näkyä vasta myöhemmin, jos mallia aletaan muuttaa tai tarkastellaan mallintamiseen kulunutta aikaa. (Ibrahim et al. 2015, s. 309–310)

Historiarakenteeseen perustuva parametrinen mallintaminen toimii siten, että avaruuden tasoon tai johonkin muuhun pintaan tehdään luonnos, jolle annetaan mittoja, ja tämän luonnoksen avulla luodaan uusia piirteitä. Piirre muodostaa siis luonnoksen kanssa yhteyden, jonka eheyden CAD-ohjelmisto pyrkii säilyttämään.

Historiaton suoramallinnus käyttää myös tasoja hyödykseen, mutta piirteet luodaan suoraan ilman luonnosta ja mitoitukset tehdään 3D ympäristössä, jos parametrisointia halutaan käyttää. Muutoin piirrettä muokataan eri työkaluilla kuten venytyksillä ja pyöristyksillä tarpeen mukaan.

4.2 Mallin muokkaaminen

Historiarakenteeseen perustuvat CAD-järjestelmät sisältävät työkaluja, jotka suoraan tai yksityiskohtaisesti vaikuttavat mallin geometriaan. Historiavapaan CAD-järjestelmän työkalut muokkaavat geometriaa parametrisesti. CAD-järjestelmän työkalu pyrkii

tunnistamaan ja muokkaamaan 3D geometriaa virtuaalisessa ympäristössä. Tämä voidaan toteuttaa joko suoralla muokkauksella (*direct edit*) tai epäsuoralla muokkauksella (*indirect edit*), oli CAD-järjestelmä sitten historiarakenteeseen perustuva tai historiavapaa. (Hakala 2015, s. 36)

4.2.1 Mallin epäsuora muokkaaminen

Epäsuora muokkaaminen on malliin kohdistuvien parametrinen työkalujen käyttöä. Näitä työkaluja voidaan käyttää molemmissa mallinnusjärjestelmissä, mutta vain historiarakenteeseen perustuva järjestelmä seuraa tehtyjä muutoksia historiapuussa ja luo relaatioita malliin. Epäsuorat muokkaukset luodaan valitsemalla työkalu, jonka avulla geometriasta valitaan muutettava kohta ja tehdään halutut toimenpiteet. Tällainen mallintaminen on kaikista yleisin tapa mallintaa nykyisissä 3D CAD ympäristöissä. (Hakala 2015, s. 37)

Vastaavia epäsuoran muokkaamisen työkaluja voidaan käyttää historiavapaassakin ympäristössä. Historiavapaa järjestelmä tallentaa tehdyt muutokset suoraan 3D B-rep malliin parametreina. Erona historiarakenne CAD-järjestelmään on, että muokkaukset tallentuvat suoraan malliin eivätkä historiapuuhun. (Hakala 2015, s. 37–38)

4.2.2 Mallin suora muokkaaminen

Suoramallinnuksen työkalut vaikuttavat suoraan mallin geometriaan, joten geometrian ei tarvitse olla älykäs, eikä mallin luomisohjelmistosta vaadita historiaa. Käyttäjän on valittava mallista muokattava geometriaosa ja miten sitä halutaan muuttaa. Eri CAD-järjestelmät tarjoavat erilaisia työkaluja monille toiminnoille, mutta tapa mallintaa on hyvin samanlainen järjestelmästä riippumatta. (Hakala 2015, s. 38–39)

Suoramallinnuksen työkaluja voidaan käyttää historiarakenteisissa mallissa. Suorat muutokset tallentuvat rakenteeseen ja vaikuttavat suoraan muihinkin piirteisiin. Yleensä suoramallinnustyökaluja ei käytetä historiarakenteisissa mallissa juurikaan, koska rakenteesta tulee hyvin monimutkainen ja malli altistuu helposti historiarakenteen rikkoutumiselle. Jos suoramallinnustyökaluja kuitenkin käytetään vasta mallin viimeistelyvaiheissa, rakenteen monimutkaisuudelta voidaan välttyä. (Hakala 2015, s. 39)

Suoramallinnustyökalut historiavapaassa CAD-järjestelmässä kohdistuvat suoraan 3D geometriaan ja mitkään geometrian ongelmat eivät ole parametreilla lukittuja tai niistä johtuvia. Jokainen muokkaus on aina yksi tapahtuma mallissa ja ne eivät muodosta

väleilleen yhteyksiä, eli ovat täysin riippumattomia edeltävistä ja tulevista muokkauksista. (Hakala 2015, s. 40)

4.3 Suoramallintamisen edut

Historiarakenteeseen perustuvan CAD-järjestelmän ja historiavapaan CAD-järjestelmän vertailussa on ymmärrettävä, miten toinen sopii tai ei sovi juuri tietyn osan tai kokoonpanon mallintamiseen. Molempien teknologioiden tarkoitus mallintamisessa on hieman erilainen ja vertailu on siksi haastavaa. (Hakala 2015, s. 42) Kuitenkin historiavapaasta suoramallintamisesta voidaan tunnistaa selkeitä asioita, jotka voidaan mainita etuina historiarakenteeseen parametriseen mallintamiseen nähden.

Aloittelevalle suunnittelijalle suoramallintaminen on yksinkertaisempi tapa mallintaa ja opetella järjestelmän ominaisuuksia. Käytössä olevia työkaluja on huomattavasti vähemmän ja haluttu muoto saadaan aikaan pienemmällä vaivalla. Suoramallinnusteknologia on juuri kehitelty sitä varten, että vältetään monimutkaisilta historiarakenteilta ja parametrisuukien aiheuttamilta virheiltä. Tämän vuoksi onkin ymmärrettävää, että sen oppiminen on yksinkertaisempaa parametriseen suunnitteluun nähden. (Ibrahim et al. 2015, s. 309)

Yksi suoramallintamisen suurimmista eduista on selkeämpi ja joustavampi tapa luoda geometriaa. Suunnittelija voi helposti luoda ja käsitellä vain muutamia eri geometriatoimintoja ja luoda silti monimutkaisia osia ja kokoonpanoja. Suoramallinnus mahdollistaa mallin kaikkien osien luonnin ja muokkaamisen, eikä pelkästään määriteltujen pintojen osalta. Suoramallinnetut mallit ovat todella joustavia myös siksi, että geometriayhteyksien puuttuminen pitää mallin yksinkertaisen CAD-järjestelmälle, kun taas parametrinen malli ei monimutkaisuuden takia pysty toteuttamaan jotain toimintoa toisen piirteen vuoksi. (Kubotek s. 5)

Suoramallintamisen ja parametrisen hallinnan yhdistäminen mahdollistaa historiavapaan geometrian ja kokoonpanon, mikä toimii suunnittelijan tarkoitusten mukaisesti. Suunnittelija voi luoda yhteyksiä ja tarkoituksia mallissa, jotka eivät haittaa mallinnusprosessia. Mallinnusprosessia ei myöskään tarvitse suunnitella etukäteen ja malleja ei tarvitse luoda alusta vain sen takia, että toteutus ei heti ollut halutunlainen. Parametrit voidaan asettaa malliin mallinnusprosessissa milloin vain ja muutenkin kaikki mallinnusvaiheet voidaan tehdä missä tahansa järjestyksessä. (Hamilton 2012)

Suoramallintaminen mahdollistaa myös CAD-järjestelmien yhteentoimivuuden toistensa välillä ja mallien tuonnin järjestelmästä toiseen. (Kubotek s 6.) Tällaiset mallit, jotka on tuotu toisesta järjestelmästä, ovat yleensä ilman mitään mallinnusdataa tai historiapuuta ja ovat parametrille järjestelmälle hankala tai lähes mahdoton muokattavaksi. Suoramallinnustyökalut voivat työstää tällaista mallia erilaisin keinoin, joita käsitellään tarkemmin kohdassa 3.2.

5. YHTEENVETO

Työssä perehdyttiin CAD-järjestelmien kehittymiseen 2D suunnittelusta nykypäivän erilaisiin 3D suunnittelutekniikoihin. CAD-järjestelmien yleisimmin käytetty tekniikka, parametrinen mallintaminen, esiteltiin toiminnaltaan ja periaatteeltaan, jotta sitä voitiin vertailla suoramallintamiseen. Suoramallinnuksen toimintaperiaatteet ja erilaiset tavat suoramallintamisesta esiteltiin. Molempien mallinnustekniikoiden eroja tarkasteltiin mallin luomisen eri vaiheissa.

CADin historian esittelyn tarkoitus oli antaa yleiskuva CAD-järjestelmien toimintaperiaatteista, miten parametriseen mallinnustekniikkaan on lopulta päädytty, ja miksi se on saavuttanut nykyisen asemansa mallintamisessa. Mallinnushistorian tarkoitus oli myös antaa tarvittavat pohjatiedot parametrisen- ja suoramallintamisen vertailun ymmärtämiseen.

Suoramallintamisen ja parametrisen mallintamisen vertailun tarkoitus oli tuoda selkeästi esille molempien tekniikoiden hyvät ja huonot puolet erilaisissa mallinnustilanteissa. Kumpikaan mallinnustekniikka ei ole täydellinen ja mallinnustekniikka tulisikin valita tilanteesta riippuen. Joissain tilanteissa paras lopputulos saadaankin hyödyntämällä molempia mallinnustekniikoita.

Suoramallinnuksen tarkoitus ei ole syrjäyttää parametrista mallintamista, vaan antaa suunnittelijoille uusia mahdollisuuksia mallintamiseen. Suoramallintaminen on huomattavasti joustavampaa ja vapaampaa kuin parametrinen mallintaminen. Joskus parametrisella mallintamisella mallin geometriaa ei voida halutulla tavalla muokata, tästä johtuen joissain tilanteissa suoramallintaminen onkin ainut vaihtoehto mallin muokkaamiselle.

Suoramallintamisen kaikki mahdollisuudet geometrian muokkaamiseen eivät ole vielä käytössä monissakaan CAD-järjestelmissä ja ne kehittyvät koko ajan. Piirteiden muokkaaminen perustuukin mallinnusohjelman omaan älykkyyteen tunnistaa mallin piirteet. Tietokoneiden laskentatehojen kasvaessa ja tekoälyn parantuessa myös piirteiden tunnistus tehostuu, joka puolestaan tehostaa suoramallinnustyökalujen toimivuutta. Mallintaminen suoramallinnustekniikalla on myös nopeampaa kuin parametrisella mallinnustekniikoilla. Suoramallinnus voikin siis tulevaisuudessa olla ensisijainen tapa mallintaa.

LÄHTEET

Autodesk, Inc.; Autodesk Announces Inventor Fusion Technology, (2009). Technology & Business Journal Atlanta, Saatavissa: <https://search-proquest-com.lib-proxy.tut.fi/docview/216558567?accountid=27303>

Hakala, P. (Jan 2015). Direct Modeling in Global CAD Environment, Tampere University of Technology, Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201502181085>

Hamilton, P. (July 2012). History-Based Modeling and Direct Editing & Parametric Direct Modeling, verkkosivu, Saatavissa: <http://p-hamilton.blogspot.fi/2012/07/>

Hirz, M., Dietrich, W., Gfrerrer, A., Lang, J. (2013). Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tut.fi/book/10.1007/978-3-642-11940-8/page/1>

Ibrahim, M. Q., Hassim, N., Yusof, A. A., Abdul Mutalib, S. Z. (2015). Direct Modelling CAD Technology Comparative Review in Efficiency and Productivity for Product Development Process, Applied Mechanics and Materials Vol. 786 pp. 305–310, Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tut.fi/docview/1707906989?accountid=27303>

Kirov, I. (2011). CAD Software NX and Solid Edge with synchronous technology, Mechanics Transport Communications Academic journal issue 1, Saatavissa: http://www.mtc-aj.com/library/-489_en.pdf

Kubotek, Direct Modeling 101, verkkodokumentti, Saatavilla: <http://info.kubotek3d.com/direct-modeling-101>

PTC, The Most Comprehensive Direct Modeling Capabilities on the Market, verkkosivut, Saatavilla: <http://www.ptc.com/en/cad/elements-direct/modeling>

Siemens PLM Software, (April 2008). Siemens PLM Software Delivers the Next Big Breakthrough in Digital Product Development with Synchronous Technology, verkkosivu, Saatavissa: https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/about_us/newsroom/press/press_release.cfm?Component=58721&ComponentTemplate=822

Tornincasa, S., Di Monaco, F. (Sept 2010). The Future and the Evolution of CAD, 14th International Research/Expert Conference, Saatavissa: <http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2010/Keynote-Tornincasa.pdf>